

CLASSIFICATION SECRET

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY

REPORT NO. [REDACTED]

INFORMATION REPORT

CD NO.

190
COUNTRY Germany (Russian Zone)

DATE DISTR. 20 Feb. 1950

SUBJECT Rectifier Bureau, Berlin

NO. OF PAGES

25X1A

PLACE
ACQUIRED [REDACTED]

IN TO C. LIBRARY

NO. OF ENCLS. 1
(LISTED BELOW)

25X1A

DATE OF IN
ACQUIRED [REDACTED]

25X1X

SUPPLEMENT TO
REPORT NO. [REDACTED]

OF THE UNITED STATES WITHIN THE MEANING OF THE ESPIONAGE ACT, 50 U. S. C. 31 AND 32 AS AMENDED. ITS TRANSMISSION OR THE REVELATION OF ITS CONTENTS IN ANY MANNER TO AN UNAUTHORIZED PERSON IS PROHIBITED BY LAW. REPRODUCTION OF THIS FORM IS PROHIBITED.

* Documentary

SOURCE

The attached photostated copy of Rectifier Bureau report No. H 213 is sent to you on loan in the belief that it may be of interest to you. Kindly return it at your convenience.

53-103 190

Encl.: 1 (33 pages).

25X1A

CLASSIFICATION SECRET

25X1A

SECRET

25X1A

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY

1. [On 13 and 14 October 1949 an inspection committee of the Apparatefabrik Treptow, Berlin-Treptow, Hoffmannstrasse 15-23, visited the Rectifier Bureau, Berlin-Oberschöneweide, Wilhelminenhofstrasse 83-85. The committee consisted of the Russian director Ivanov, the German technical director Mueller, and the chief of development, Dr. Mau, and had ostensibly come to the Rectifier Bureau in order to discuss ways and means of incorporating the Rectifier Bureau into the Apparatefabrik Treptow.] The committee displayed great interest in the Rectifier Bureau and apparently seemed to be willing to take it over entirely with some organizational changes. The committee suggested that a so-called Project Bureau be established at the Rectifier Bureau consisting of all members of the Technical Bureau (Schmallenberg, Hölter, Filberich, Henselmeyer, Schiele) and some people from the Electrotechnical Laboratory. The Project Bureau, although it would work at the Apparatefabrik Teltow, which is part of the SAG Izolyator, would nevertheless be financed by the Deutsche Wirtschaftskommission, probably Hauptverwaltung Maschinenbau-und Elektrotechnik, while the production part of the Rectifier Bureau would be paid by the SAG Izolyator. Final decision by the Apparatefabrik Treptow with regard to the Rectifier Bureau can be expected by 21 October 1949. Already the employees of the Rectifier Bureau have been cautioned that under new management they should expect some cuts in their salaries.
2. At present a new shipment of rectifiers and instruments is being assembled and is expected to leave for Russia at the end of this month. The shipment consists of three 7/6 rectifiers, two 1/1 rectifiers, one Rollen Schweiss-Maschine which was constructed at Hennigsdorf, one electron microscope from Oberspreewerke. The next shipment will consist of two 7/6 and two 1/1 rectifiers now under construction at the Rectifier Bureau and will be made in December. The rest of the material and time available is to be utilized for the construction of two 7/6 rectifiers, one of which is destined for the hydrogenation plant Doehlen.
3. The enclosed photostated copy of technical report H 213, dated 28 September 1949 and entitled "Die Grundwellenleistungen des Wechselrichters" is sent to you on loan in the belief that it may be of interest. Kindly return it at your convenience.

SECRET

25X1A

- 2 -

	Technischer Bericht	H 213
<u>T h e m a :</u> Die Grundwellenleistungen des Wechselrichters.		
Anzahl der Textblätter: 16		
Anzahl der Beilagen: 12		
Anzahl der Fotos: -		
		Datum: 28. 9. 1949
<u>Kurze Inhaltsangabe:</u> Es wird der Einfluß der Streureaktansen des Wechselrichtertrans- formators auf die Grundwellenströme, Spannungen und Leistungen auf der Netz- und Gefäßseite untersucht und berechnet. Die mathematische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit		

i n h a l t s v e r z e i c h n i s =====

	<u>Seite</u>
1. Zweck der Untersuchung	1
2. Leistungsverhältnisse auf der Netzseite . . .	1 - 11
2.1 Allgemeine Gleichungen für den Leistungsfaktor	1 - 2
2.2 Strom und Leistungen beim streuungslosen Transformator	2 - 4
2.3 Transformator mit Streuung	4 - 11
2.31 Amplitude und Phase des Stromes	4 - 7
2.32 Leistungen	8 - 11
3. Leistungsverhältnisse auf der Gefüßseite . . .	12 - 16
3.1 Amplitude und Phase der Streuspannung . .	12 - 15
3.2 Leistungen	15 - 16

B i l d e r v e r z e i c h n i s

=====

- Abb.1 Grundwelle des Netzstromes als Funktion der Überlappung bei verschiedenen Zündwinkeln
- Abb.2 Vektordiagramm des Wechselrichters Transformator ohne Streuung
- Abb.3 Phasenwinkel des Netzstromes als Funktion der Überlappung bei verschiedenen Zündwinkeln
- Abb.4 Vektordiagramm des Wechselrichters. Transformator mit Streuung, konstanter Leistungsfaktor
- Abb.5 Vektordiagramm des Wechselrichters. Transformator mit Streuung, konstanter Löschwinkel
- Abb.6 Vektordiagramm des Wechselrichters. Transformator mit Streuung, konstanter Zündwinkel
- Abb.7 Strömung und Spannungen auf der Gefäßseite des Wechselrichtertransformators
- Abb.8 Grundwelle der Streuspannung des Transformators als Funktion der Überlappung bei verschiedenen Zündwinkeln
- Abb.9 Phasenwinkel der Streuspannung, Grundwelle als Funktion der Überlappung bei verschiedenen Zündwinkeln
- Abb.10 Vektordiagramm des Wechselrichters. Einfügung der Streuspannung
- Abb.11 Leistungen auf der Netz- und Gefäßseite, konstanter Leistungsfaktor
- Abb.12 Leistungen auf der Netz- und Gefäßseite, konstanter Löschwinkel

Die Grundwellenleistungen des Wechselrichters.

1. Zweck der Untersuchung.

Messungen an der Modellanlage haben ergeben, daß die Bestimmung der Blindleistung auf der Wechselrichterseite insofern auf Schwierigkeiten stößt, als Messungen auf der Netzseite wegen der großen Magnetisierungsleistung der Modelltransformatoren mit genügender Genauigkeit schwer durchführbar sind. Blindleistungsmessungen auf der Gefäßseite der Stromrichtertransformatoren führten zu erheblichen Abweichungen von den berechneten Werten der netzseitigen Steuer- und Kommutierungsblindleistung. Dies ist auch zu erwarten, da ein Teil der von der Netzseite gelieferten Blindleistung in den Streuinduktivitäten des Transformators gespeichert wird und daher auf der Gefäßseite des Transformators nicht mehr in Erscheinung tritt. Es war nun notwendig, den Betrag dieser Blindleistung rechnerisch zu bestimmen.

Nachstehend sollen daher die Leistungsverhältnisse des Wechselrichters auf der Netz- und Gefäßseite klar gestellt werden. Hierbei mußte zum Teil auch bereits Bekanntes der Vollständigkeit halber nochmals aufgeführt werden. Den Untersuchungen sei eine 3-phasige Graetzschaltung zu Grunde gelegt. Es werden im Folgenden nur die Grundwellenleistungen berücksichtigt, da die Oberwellenleistungen der gegenüber zu vernachlässigen sind. Zudem wird auf der Netzseite eine starre oberwellenfreie Spannung vorausgesetzt, so daß in der Wirkleistung sowieso nur die Grundwelle vorhanden ist. Die Glättungs-drossel wird als unendlich groß und der Transformator als verlustlos angenommen. Der Magnetisierungsstrom des Transformators wird nicht berücksichtigt.

2. Leistungsverhältnisse auf der Netzseite.

2.1 Allgemeine Gleichungen für den Leistungsfaktor.

Die auf der Gleichstromseite an den Wechselrichter abgegebene Wirkleistung ist bei einer Gleichspannung U_g und einem Gleichstrom I_g

$$N_g = U_g \cdot I_g \quad (1)$$

-2-

H 213

Diese Wirkleistung tritt auf der Netzseite wieder in Erscheinung (verlustloser Transformator).

$$\underline{N_{mw} = N_g} \quad (2)$$

Aus der Grundwelle I_n des Netzstromes ergibt sich die Wirkleistung zu:

$$N_{mw} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot J_n \cdot \cos \varphi_n = U_g \cdot J_g \quad (3)$$

wenn U_n die verkettete Netzspannung und $\cos \varphi_n$ den Leistungsfaktor der Grundwelle auf der Netzseite darstellt. Aus (3) folgt:

$$\cos \varphi_n = \frac{U_g \cdot J_g}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot J_n} \quad (4)$$

$$\cos \varphi_n = \frac{\sqrt{6}}{r} \cdot \frac{J_g}{J_n} \cdot \frac{E_g + j \cdot X_{ag}}{E_{go}} \quad (5)$$

$$\cos \varphi_n = \frac{\sqrt{6}}{r} \cdot \frac{J_g}{J_n} \cdot \frac{U_g}{E_{go}} \quad (6)$$

$$\cos \varphi_n = \frac{\sqrt{6}}{r} \cdot \frac{J_g}{J_n} \cdot \frac{\cos \alpha + \cos \lambda}{2} \quad (7)$$

Hierin bedeuten:

- E_{go} die Leerlaufgleichspannung des Wechselrichters bei voller Aussteuerung
- E_g die Leerlaufspannung des Wechselrichters bei einem Zündwinkel α ($E_g = E_{go} \cdot \cos \alpha$)
- X_{ag} den auf die Gleichstromseite bezogenen Ersatzwiderstand des induktiven Gleichspannungsabfalls
- λ den Löschwinkel

-3-

H 213

2.2 Strom und Leistungen beim streuungslosen Transformator.

Für den streuungslosen Transformator ($\mu=0$) ist bekanntlich der Phasenwinkel der Grundwelle gleich dem Zündwinkel.

$$\alpha = \varphi_n$$

$$\cos \varphi_n = \cos \alpha = \frac{E_g}{E_{go}} \quad (8)$$

Daraus ergibt sich die Grundwelle des Netzstromes zu:

$$J_n = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot J_g \quad (9)$$

bzw. der Scheitelwert

$$\hat{J}_n = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot J_g \quad (10)$$

Die Scheinleistung der Grundwelle ist:

$$N_{ns} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot J_n$$

$$N_{ns} = \sqrt{3} \cdot \frac{\pi \cdot E_{go}}{3 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot J_g$$

$$N_{ns} = E_{go} \cdot J_g \quad (11)$$

Die Blindleistung der Grundwelle beträgt:

$$N_{ns} = E_{go} \cdot J_g \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

Die Blindleistung ist in diesem Falle nur vom Steuerwinkel des Wechselrichters abhängig und wird bekanntlich als Steuerblindleistung bezeichnet. Diese Blindleistung ist durch den Schaltmechanismus des Wechselrichters bedingt. Bei einer 2-phasigen Stromrichterschaltung wird diese Blindleistung in der gleichstromseitigen Glättungsdrössel gespeichert. Bei 3-phasigen Schaltungen kompensieren sich die Blindleistungen der 3 Phasen an der Glättungsdrössel und der Energieaustausch erfolgt nun gewissermaßen zwischen den 3 Phasen.

Beim streuungslosen Transformator steigt proportional mit der Größe der übertragenen Wirkleistung der Blindleistungsbedarf

-4-

B 213

des Wechselrichters, der zur Durchführung eines stabilen Betriebes ($\lambda > 0$) notwendig ist. Ißchwinkel, Zündwinkel und Leistungsfaktor sind miteinander identisch.

Die vorstehend berechneten Werte sind in dem Vektordiagramm Abb.2 grafisch dargestellt. Die Grundwelle I_n des Netzstromes schließt mit der Sekundärspannung E_s den Winkel φ_n ein. Entsprechend sind die Netzleistungen eingetragen. Der Maßstab ist so gewählt, daß die Grundwellenscheinleistung N_{ns} mit dem Strom übereinstimmt. Ferner sind die Gleichspannungen E_g und E_{g0} eingezeichnet, wobei der Maßstab ebenfalls so gewählt ist, daß E_{g0} sich mit E_s deckt. Bei einer Änderung des Stromes läuft die Pfeilspitze von I_n auf der Geraden (1) entlang. Die zugehörigen Grundwellenleistungen ergeben sich aus dem schraffierten Dreieck.

2.1 Transformator mit Streuung.

2.31 Amplitude und Phase des Stromes.

Berücksichtigt man die Transformatorstreuung, so werden die Flanken der Stromblöße, da nunmehr keine momentanen Stromänderungen mehr möglich sind, in bekannter Weise abgeschliffen. Es ist anzunehmen, daß sich nunmehr auch die Grundwelle dieses Stromes im Verhältnis zum Gleichstrom gegenüber Gleichung (9, 10) ohne Streuung ändern wird. Nimmt man zunächst einen linearen Stromverlauf während der Kommutierung an, so ergibt sich die Grundwelle des Netzstromes zu:

$$J_n = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot J_g \cdot \frac{\sin \frac{\mu}{2}}{\frac{\mu}{2}} \quad (13)$$

bezw. der Scheitelwert

$$\hat{J}_n = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot J_g \cdot \frac{\sin \frac{\mu}{2}}{\frac{\mu}{2}} \quad (14)$$

Die Stromgrundwelle ist also nur vom Gleichstrom und der Überlappung abhängig und um den Faktor $\sin \frac{\mu}{2} / \frac{\mu}{2}$ kleiner als bei dem streuungslosen Transformator (s.auch Schilling "Gleichrichterschaltungen" S.188).

Legt man den tatsächlichen Stromverlauf während der "berlappungs-dauer, der sich aus dem 2-poligen Kurzschlußstrom des Transformators ergibt, für die Berechnung der Grundwelle zu Grunde, so geht auch noch der Zündwinkel in die Formel ein und man erhält für den Scheitelwert der Grundwelle:

$$\hat{J}_n = \frac{\sqrt{3}}{r} \cdot J_g \cdot \frac{\sqrt{\bar{u}^2 - 2 \bar{u} \cdot \sin \bar{u} \cdot \cos(2\alpha - \bar{u}) + \sin^2 \bar{u}}}{\cos(\alpha - \bar{u}) - \cos \alpha} \quad (15)$$

In Abb.1 ist die auf den Gleichstrom bezogene Stromgrundwelle, berechnet aus den 3 Gleichungen (10, 14, 15), als Funktion der "berlappung wiedergegeben. Die Linie a stellt die erste Näherung ohne Berücksichtigung der "berlappung entsprechend Gleichung (10) dar. Kurve b entspricht der zweiten Näherung nach Gleichung (14). Die ausgezogenen Kurven c geben die exakte Berechnung nach der Gleichung (15) wieder, wobei für den Zündwinkel α als Parameter Werte von $15...40^\circ$ zu Grunde gelegt sind. Diese Kurven weisen für $\bar{u}=0$ ein Maximum und für $\alpha = \bar{u}$ ($\lambda = 0^\circ$) ein Minimum auf. Die Minima sind durch die gestrichelte Kurve verbunden, diese stellt also gleichzeitig die theoretische Kippgrenze des Wechselrichters dar. Ein stabiler Wechselrichterbetrieb ist also theoretisch nur in dem schraffierten Bereich möglich. Praktisch wird man den Wechselrichter nicht mit einem kleineren Löschwinkel als höchstens 5° betreiben. Diese Punkte sind auf den Kurven c markiert.

Aus Abb.1 ergibt sich, daß die Abweichungen der ersten Näherung ohne Berücksichtigung der "berlappung entsprechend Kurve a von der exakten Berechnung nach den Kurven c mit zunehmender "berlappung zwar zunimmt, aber selbst bei $\alpha = 40^\circ$ und $\bar{u} = 35^\circ$ nur rund 1% beträgt. Wesentlich genauere Werte ergibt die zweite Näherung nach Kurve b. Die Abweichung ist hier nur maximal nur 3 % bei den obigen Werten. Je größer der Löschwinkel ist, umso geringer werden die Unterschiede zwischen der zweiten Näherung und der exakten Berechnung, da sich dann auch der Stromverlauf während der Kommutierung immer mehr dem gradlinigen Verlauf angleicht. So beträgt z.B. der Fehler bei $\lambda = 15^\circ$ und $\bar{u} = 25^\circ$ nur noch 0,5 %.

Bei den vorliegenden Untersuchungen sind die Genauigkeiten der ersten Näherung vollauf ausreichend. Man kann dann also die Grundwelle des Netzstromes unabhängig von der Größe der "berlappung

und dem Steuerwinkel dem Gleichstrom proportional annehmen. Wie beim streuungslosen Transformator ist dann:

$$J_n = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot J_g \quad (16)$$

Infolge der Abflachung der Stromkurven während der "Überlappung" tritt eine Phasenverschiebung und zwar eine Phasennachstellung der Stromgrundwelle gegenüber der Rechteckkurve bei streuungslosem Transformator auf. Der Grundwellenleistungsfaktor ist also nicht mehr gleich $\cos \alpha$ bzw. $\cos \lambda$, sondern beträgt:

$$\cos \varphi_n = \cos \left(\alpha - \frac{\bar{u}}{2} + \varphi' \right) = \cos \left(\lambda + \frac{\bar{u}}{2} + \varphi' \right) \quad (17)$$

wobei

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{\bar{u} - \sin \bar{u}}{\bar{u} + \sin \bar{u}} \cdot \operatorname{ctg} \left(\alpha - \frac{\bar{u}}{2} \right) \quad (18)$$

ist. In Abb.3 ist der Verlauf von φ_n abhängig von \bar{u} für verschiedene Steuerwinkel nach Gleichung (17, 18) dargestellt (ausgezogene Kurven). Für $\bar{u}=0^\circ$ ist der Phasenwinkel identisch mit dem Zündwinkel. Mit zunehmender "Überlappung" nimmt der Phasenwinkel ab. Die Kurven haben für $\alpha = \bar{u}$ ($\lambda = 0^\circ$) ein Minimum. Diese Punkte sind durch eine Gerade verbunden, die wiederum die Kippgrenze des Wechselrichters darstellt. Desgleichen sind die Geraden für $\lambda = 5^\circ$ und $\lambda = 10^\circ$ eingetragen.

Setzt man einen linearen Stromverlauf während der Kommutierung voraus, so erhält man eine erste Näherung:

$$\varphi_n = \alpha - \frac{\bar{u}}{2} \quad (19)$$

Die Abweichung des Stromes während der Kommutierung von dem linearen Verlauf bringt also nach Gleichung (17, 19) eine Verlegung der Grundwelle um φ' .

Die Geraden der Gleichung (19) sind ebenfalls in Abb.3 eingetragen (strichpunktiert). Während bei kleinen Überlappungen die erste Näherung noch genügend genaue Werte ergibt, betragen bei $\lambda = 5^\circ$ die Abweichungen bereits fast 5° für $\alpha = 40^\circ$. Während also die Annahme einer linearen Kommutierung bei der Berechnung der

-7-

H 213

Grundwelle des Netzstromes eine sehr gute Näherung ergibt, ist dies bei der Bestimmung der Phase nicht in demselben Maße der Fall. Eine bessere "Bereinstimmung" liefert die zweite Näherung, die bereits auf der Tatsache fußt, daß die Grundwelle des Netzstromes von dem Zündwinkel und der Überlappung praktisch unabhängig ist. Setzt man nämlich den Näherungswert (16) der Grundwelle des Stromes in die Gleichung (7) ein, so ergibt sich

$$\cos \varphi_n = \frac{\cos \alpha + \cos \lambda}{2} \quad (20)$$

Diese Gleichung entspricht den gestrichelten Kurven in Abb. 3. Die größte Abweichung beträgt dann für $\lambda = 5^\circ$ und $\alpha = 40^\circ$ rund 1° . Man kann also die obige zweite Näherung mit genügender Genauigkeit benutzen und sie sei den weiteren Betrachtungen zu Grunde gelegt.

Damit ergibt sich weiterhin:

$$\cos \varphi_n = \frac{U_g}{E_{g0}} \quad (21)$$

$$\cos \varphi_n = \cos \alpha + \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \quad (22)$$

$$\cos \varphi_n = \cos \lambda - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \quad (23)$$

$$\cos \lambda = \frac{E_{g\lambda}}{E_{g0}} \quad (24)$$

$$\cos \alpha = \frac{E_g}{E_{g0}} \quad (25)$$

$$\sin \varphi_n = \sqrt{1 - \left(\frac{U_g}{E_{g0}}\right)^2} \quad (26)$$

Hierin bedeuten J_g' den auf den Nennwert bezogenen Gleichstrom und u_k die Nennkurbschlußspannung.

2.32 Leistungen:

Die Scheinleistung der Grundwelle wird, da die Grundwelle des Netzstromes mit und ohne Überlappung praktisch dieselbe ist, wieder wie im Falle $u=0$

$$\underline{N'_{ns} = E_{g0} \cdot J_g} \quad (27)$$

Die Netzscheinleistung ist also unabhängig von der Größe der Überlappung mit dem Gleichstrom proportional.

Wenn wir nun auf die Wirkleistung und Blindleistung eingehen, müssen wir unterscheiden, ob der Wechselrichter mit konstantem Leistungsfaktor, konstantem Löschwinkel oder konstantem Zündwinkel betrieben wird.

Arbeitet der Wechselrichter mit konstantem Leistungsfaktor, so ist die Gleichspannung gemäß (21) unabhängig von der Belastung konstant.

$$\cos \varphi_n = \text{konst.} \quad U_g = \text{konst.} \quad (28)$$

Wirkleistung und Blindleistung auf der Netzseite sind, wie beim streuungslosen Transformator, dem Gleichstrom proportional.

$$\underline{N_g = J_g \cdot U_g = \text{konst.} \cdot J_g} \quad (29)$$

$$\underline{N_{ng} = J_g \cdot \sqrt{E_{g0}^2 - U_g^2} = \text{konst.} \cdot J_g} \quad (30)$$

Für den Zündwinkel ergibt sich:

$$\underline{\cos \alpha = \cos \varphi_n - \frac{u_n}{E} \cdot J_g' = \text{konst.} - \frac{u_n}{E} \cdot J_g'} \quad (31)$$

und für den Löschwinkel

$$\underline{\cos \lambda = \cos \varphi_n + \frac{u_n}{E} \cdot J_g' = \text{konst.} + \frac{u_n}{E} \cdot J_g'} \quad (32)$$

Die Stabilität des Wechselrichters (λ) nimmt also mit zunehmender Belastung ab. Bei Berücksichtigung der Transformatorstreuung reicht also im Gegensatz zum streuungslosen Transformator eine

mit der Wirkleistung proportionale Zunahme der Blindleistung nicht aus, um den Wechselrichter mit konstantem Löschwinkel zu betreiben. Die fehlende Blindleistung führt zu einer Verringerung der Stabilität.

In Abb.4 sind die Verhältnisse bei konstantem Leistungsfaktor wiederum vektoriell dargestellt. Die Grundwellenleistungen ergeben sich aus dem schraffierten Dreieck. Die Stabilität des Wechselrichters (λ) nimmt entsprechend Kurve 2 ab bei konstantem Verschiebungswinkel (φ_n , Kurve 1) und zunehmendem Zündwinkel (Kurve 3). Ferner sind die Gleichspannung U_g , die Leerlaufspannung

$$E_g = E_{g0} \cdot \cos \alpha = U_g - X_{ag} \cdot J_g = U_g - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \cdot E_{g0} \quad (33)$$

und die Löschwinkelgleichspannung

$$E_{g\lambda} = E_{g0} \cdot \cos \lambda = U_g + X_{ag} \cdot J_g = U_g + \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \cdot E_{g0} \quad (34)$$

dargestellt.

Arbeitet der Wechselrichter bei konstantem Löschwinkel, also konstanten Stabilitätsverhältnissen, so wird die Gleichspannung bei Belastung

$$U_g = E_{g\lambda} - X_{ag} \cdot J_g \quad (35)$$

$$U_g = \text{konst} - X_{ag} \cdot J_g = \text{konst} - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \cdot E_{g0} \quad (36)$$

Die Wirkleistungsabgabe auf der Gleichrichterseite wird nunmehr

$$N_g = J_g (E_{g\lambda} - X_{ag} \cdot J_g) \quad (37)$$

$$N_g = J_g (\text{konst} - X_{ag} \cdot J_g) \quad (38)$$

Dies bedeutet, daß die Wirkleistung weniger als proportional mit dem Gleichstrom zunimmt und somit der Grundwellenleistungsfaktor der Netzseite mit zunehmendem Strom abnimmt.

Für den Leistungsfaktor und den Zündwinkel ergibt sich:

$$\cos \varphi_n = \cos \lambda - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' = \text{konst} - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \quad (39)$$

$$\cos \alpha = \cos \lambda - u_k \cdot J_g' = \text{konst} - u_k \cdot J_g' \quad (40)$$

Soll der Wechselrichter wie beim streuungslosen Transformator mit konstanten Stabilitätsverhältnissen ($\lambda = \text{konst}$) betrieben werden, so ist bei dem Transformator mit Streuung eine größere Blindleistung erforderlich. Die Blindleistung nimmt also mehr als proportional mit dem Gleichstrom und der Wirkleistung zu.

In Abb.5 ist das Vektordiagramm des Wechselrichters für den Fall konstanten Löschwinkels dargestellt. Man erkennt die Zunahme des Verschiebungswinkels (φ_n , Kurve 1) und die Zunahme des Zündwinkels (α , Kurve 3) bei konstantem Löschwinkel (λ , Kurve 2) mit zunehmender Belastung. Außerdem sind wie in Abb.4 die Gleichspannungen

$$U_g = E_g \lambda - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \cdot E_g \quad (41)$$

$$E_g = E_g \lambda - \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \cdot E_g \quad (42)$$

eingetragen.

Es sei nun der Fall behandelt, daß der Wechselrichter mit konstantem Zündwinkel betrieben wird. Die Gleichspannung bei Belastung ist dann:

$$U_g = E_g + X_{ag} \cdot J_g \quad (43)$$

$$U_g = \text{konst} + X_{ag} \cdot J_g = \text{konst} + \frac{u_k}{2} \cdot J_g' \cdot E_g \quad (44)$$

Die Wirkleistungsabgabe auf der Gleichrichterseite ist

$$N_g = J_g (E_g + X_{ag} \cdot J_g) \cdot J_g (Konst + X_{ag} \cdot J_g) \quad (45)$$

Die Wirkleistung nimmt nun mehr als proportional mit dem Gleichstrom zu, das bedeutet, daß auch der Grundwellenleistungsfaktor mit zunehmendem Strom zunimmt.

Der Leistungsfaktor ergibt sich zu:

$$\cos \varphi_n = \cos \alpha + \frac{u_K}{2} J_g' = konst + \frac{u_K}{2} J_g' \quad (46)$$

Die Verbesserung des Leistungsfaktors geht auf Kosten der Wechselrichterstabilität, da der LÜschwinkel entsprechend

$$\cos \lambda = \cos \alpha + u_K \cdot J_g' = konst + u_K \cdot J_g' \quad (47)$$

abnimmt.

Abb.6 zeigt wiederum das Vektordiagramm des Wechselrichters. Man erkennt die Abnahme der Stabilität (λ , Kurve 2) und die Abnahme des Verschiebungswinkels (φ_n , Kurve 1) bei konstantem Zündwinkel (α , Kurve 3). mit zunehmender Belastung. Die Gleichspannungen E_g , U_g und $E_{g\lambda}$ sind ebenfalls eingezeichnet.

Abschließend läßt sich sagen, daß der Blindleistungsbedarf des Wechselrichters einmal bedingt ist durch die Größe des LÜschwinkels, d.h. die Stabilität (Steuerblindleistung) und zum anderen durch die Streureaktanzen des Transformators (Kommutierungsblindleistung). Bei konstanter Netzblindleistung wird mit zunehmender Streuung des Transformators die Stabilität des Wechselrichters verringert. Das Netz muß also beim Transformator mit Streuung bei konstanten Stabilitätsverhältnissen zusätzliche Blindleistung für die Streureaktanzen aufbringen.

Hiermit wären die Verhältnisse auf der Netzseite soweit geklärt, und es kann im folgenden Abschnitt auf die Gefäßseite des Stromrichtertransformators eingegangen werden.

2. Leistungsverhältnisse auf der Gefäßseite.

2.1 Amplitude und Phase der Streuspannung.

Da der Transformator als verlustlos angenommen wurde, ist die Wirkleistung auf der Netzseite und der Gefäßseite dieselbe und identisch mit der Gleichstromleistung. Wie bereits eingangs erwähnt wurde, ist die Blindleistung auf der Gefäßseite sicherlich kleiner als auf der Netzseite, da ein Teil der netzseitigen Blindleistung auf die Streureaktanzen des Transformators entfällt. Da der Strom auf der Netzseite mit dem auf der Gefäßseite identisch ist, kann die Abnahme der Blindleistung nur durch eine Änderung der Spannung auf der Gefäßseite bedingt sein.

In Abb.7 ist der Spannungsverlauf auf der Sekundärseite des Transformators wiedergegeben. Während der Kommutierungsvorgänge bricht die Phasenspannung auf den Mittelwert der verketteten Spannung der kommutierenden Anoden zusammen. In der kommutierungsfreien Zeit ist die Transformatorspannung im Leerlauf mit der Spannung bei Belastung identisch, da der Strom unter der Annahme eines verlustlosen Transformators keinen Spannungsabfall hervorruft.

Durch die Kommutierungslücken wird die Grundwelle der sekundären Transformatorspannung nach vorne verschoben. Dies ist gleichbedeutend mit einer Verringerung der Blindleistung auf der Gefäßseite. Zur genaueren Berechnung wurde die Grundwelle der an den Streuinduktivitäten liegenden Spannung nach Betrag und Phase ermittelt. In Abb.7 ist die Spannung an der Streureaktanz des Transformators mit e_{σ} bezeichnet. Dabei ist die gesamte Streureaktanz auf die Sekundärseite des Transformators reduziert. Wie aus Abb.7 hervorgeht, ist die Spannung an den Streureaktanzen während der Überlappungsdauer identisch mit der halben verketteten Spannung der kommutierenden Phasen. Außerhalb der Kommutierungszeit ist die Spannung Null.

Der Effektivwert der Grundwelle der Streuspannung auf die Sekundärseite des Umspanners reduziert, errechnet sich abhängig von \bar{u} und α zu:

$$E_{\sigma} = \frac{3}{2\pi} \cdot E_s \cdot \sqrt{u^2 - 2\bar{u} \cdot \sin \bar{u} \cdot \cos(2\alpha - \bar{u}) + \sin^2 \bar{u}} \quad (48)$$

-13-

H 213

wenn E_g den Effektivwert der sekundären Phasenspannung darstellt. Diese Beziehung ist in Abb.8 abhängig von der Überlappung für verschiedene α -Werte als Parameter dargestellt. Die Kurven gehen für $u=0$ alle durch Null und haben für $\alpha=u$ ein Maximum. Die Kurve E_σ / E_g für $\alpha=u$, die ebenfalls eingezeichnet ist, stellt den geometrischen Ort der Maxima dar.

Fügt man in die Gleichung (46) den Ausdruck für die Grundwelle des Stromes gemäß Gleichung (15) ein, so erhält man:

$$E_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot E_g \cdot \frac{\hat{J}_n}{J_g} [\cos(\alpha - \hat{u}) - \cos \alpha]$$

$$E_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot E_g \cdot \frac{J_n}{J_g} [\cos \lambda - \cos \alpha] \quad (49)$$

Nun ist

$$\cos \lambda - \cos \hat{u} = u_k \cdot J_g' \quad (50)$$

und damit

$$E_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot u_k \cdot E_g \cdot \frac{J_n}{J_g} \cdot J_g' \quad (51)$$

Wie im vorigen Abschnitt behandelt wurde, kann man mit guter Annäherung die Grundwelle I_n des Netzstromes dem Gleichstrom proportional setzen (Gleichung 16). Damit wird

$$E_\sigma = \frac{1}{\pi} \cdot u_k \cdot E_g \cdot J_g' \quad (52)$$

Es ergibt sich damit eine sehr einfache Beziehung zur Berechnung des Grundwellenanteiles der Spannungsblöcke an den Streureaktanzen.

Berechnet man ungefähr aus dem Grundwellenstrom den Streuspannungsabfall an der Streureaktanz des Transformators, so ergibt sich:

$$E_\sigma = J_n \cdot X_\sigma$$

$$E_\sigma = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot J_g \cdot u_k \cdot \frac{E_g}{\sqrt{3} \cdot J_{g \text{ norm}}}$$

$$E_{\sigma} = \frac{3}{\pi} \cdot u_k \cdot E_s \cdot J_g' \quad (53)$$

Die Grundwelle der Spannungen, die während der Kommutierungsdauer an den Streureaktanzen des Transformators auftreten, ergibt sich also, wie bei dem Drehstromtransformator, aus der Grundwelle des Stromes, multipliziert mit dem Streuwiderstand. Dieser Spannungsabfall ist um rund 4 % kleiner als bei normaler Drehstrombelastung des Transformators. Er eilt der Grundwelle des Stromes um 90° nach. Auf die Phasenlage der Streuspannung sei im Folgenden noch kurz eingegangen.

Der Phasenwinkel der Grundwellenspannung an den Streuinduktivitäten läßt sich berechnen aus

$$\varphi_{\sigma} = 90^\circ + \varphi' \quad (54)$$

Hierin ist:

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{3\bar{u} - \sin \bar{u} [\sqrt{3} \cdot \sin(2\alpha - \bar{u}) + 3 \cos(2\alpha - \bar{u})]}{-\sqrt{3} \bar{u} - \sin \bar{u} [3 \cdot \sin(2\alpha - \bar{u}) - \sqrt{3} \cdot \cos(2\alpha - \bar{u})]} \quad (55)$$

Der Phasenwinkel φ_{σ} ist in Abb. 9 abhängig von \bar{u} für verschiedene α -Werte als Parameter dargestellt.

Den Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel des Stromes und der Streuspannung erhält man aus den Gleichungen (17, 18 und 54, 55) zu:

$$\varphi_{\sigma} = 90^\circ - \varphi_n \quad (56)$$

Die Grundwelle des Netzstromes und der Streuspannung stehen also, wie bereits erwähnt, senkrecht aufeinander.

In Abb. 10 ist der Streuspannungsabfall E_{σ} im Transformator in das Vektordiagramm des Wechselrichters eingetragen. Aus der sekundären Leerlaufspannung E_s und E_{σ} resultiert dann die Sekundärspannung E'_s bei Belastung. Diese schließt mit der Grundwelle I_n des Netzstromes den Winkel φ_n ein. Von der gesamten Blindspannung (ac) entfällt also nur die Spannung (ab) auf den Transformator.

-15-

H 213

Bisher war das Netz als starr angenommen worden. Es ergeben sich jedoch keine neuen Gesichtspunkte, wenn man die Streureaktanzen des Netzes berücksichtigt. E_{σ} wird sich dann im Verhältnis der Streureaktanzen auf das Netz und den Umspanner aufteilen.

3.2 Leistungen

Nachdem nun die Grundwelle der Streuspannung bekannt ist, kann die Grundwellenblindleistung, die in den Streuinduktivitäten des Transformators gespeichert wird, berechnet werden. Sie ergibt sich zu:

$$N_{\sigma B} = 3 \cdot E_{\sigma} \cdot J_n \quad (57)$$

$$N_{\sigma B} = 3 \cdot \frac{3}{T} \cdot u_K \cdot E_s \cdot J_g' \cdot \frac{W}{T} \cdot J_g \quad (58)$$

Setzt man ein:

$$E_s = \frac{T \cdot E_{g0}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} \quad (59)$$

so ergibt sich:

$$N_{\sigma B} = \frac{3}{T} \cdot u_K \cdot J_g \cdot E_{g0} \cdot J_g' \quad (60)$$

$$N_{\sigma B} = \frac{3}{T} \cdot u_K \cdot N_{\sigma 0} \cdot J_g' = 0,986 \cdot u_K \cdot N_{\sigma 0} \cdot J_g' \quad (61)$$

Diese Streublindleistung ist nur vom Strom und der Kurzschlußspannung abhängig und hat praktisch denselben Wert wie bei normaler Drehstrombelastung des Transformators.

Da die gesamte auf der Netzseite auftretende Grundwellenblindleistung

$$N_{\sigma 0} = J_g \sqrt{E_{g0}^2 - u_K^2} = J_g \cdot E_{g0} \cdot \sin \varphi_n \quad (62)$$

beträgt, so verbleibt auf der Sekundärseite des Transformators die Blindleistung:

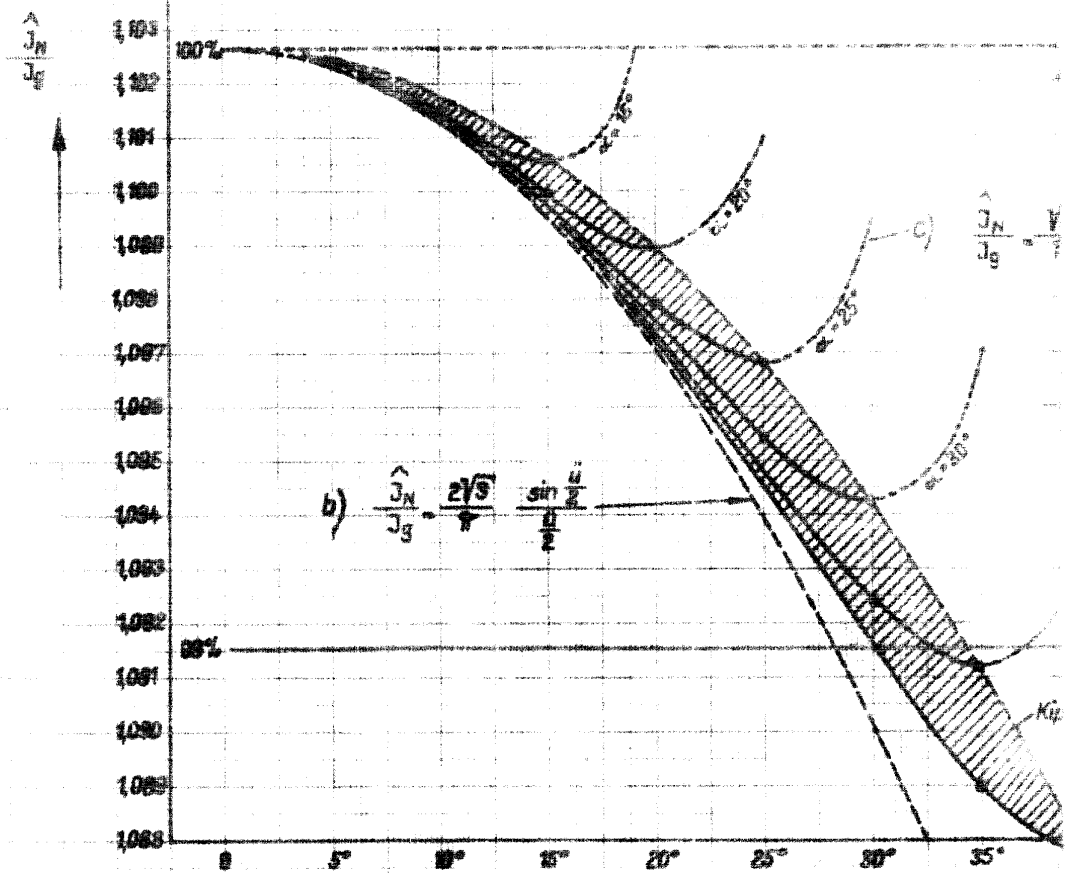
$$N_{\sigma S} = N_{\sigma 0} - N_{\sigma B} \quad (63)$$

-16-

E 213

In Abb.10 ist die Strecke (od) proportional der Wirkleistung und die Strecke (ac) proportional der Blindleistung. Letztere teilt sich auf in die an den Transformator abgegebene Streublindleistung (ab) und die über die Gefäßschaltung abgegebene Blindleistung (bc). Diese wird von jeder Phase der Glättungsdrössel zugeführt und dort von den beiden anderen Phasen kompensiert.

In den Abb.11 und 12 sind die Leistungen auf der Netz- und Gefäßseite für konstanten Leistungsfaktor und konstanten Lösschwinkel abhängig vom Gleichstrom dargestellt. Die Streublindleistung $N'_{\sigma B}$ ist in beiden Fällen gleich groß, da sie nur vom Strom abhängig ist. Die sekundärseitig an die Gefäßschaltung abgegebene Blindleistung N'_{aB} ergibt sich aus der schraffierten Fläche.

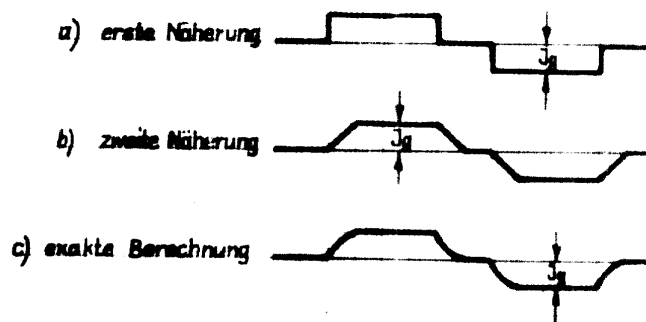
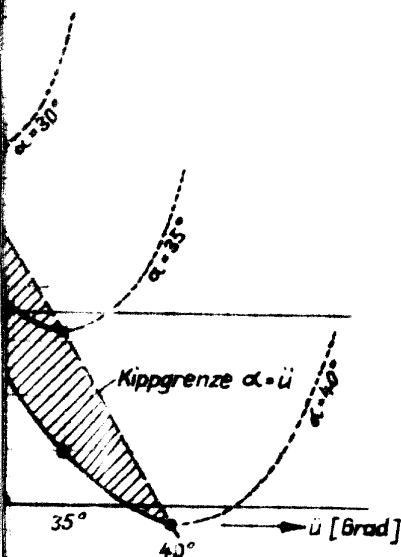


H 213

$$a) \frac{\hat{J}_N}{J_g} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$$

 \ddot{u} Überlappung \hat{J}_N Scheitelwert der Grundwelle
des Netzstromes J_g Gleichstrom α Zündwinkel

$$c) \frac{\hat{J}_N}{J_g} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{\ddot{u}^2 - 2\ddot{u} \cdot \sin \ddot{u} \cdot \cos(2\alpha - \ddot{u}) + \sin^2 \ddot{u}}}{\cos(\alpha - \ddot{u}) - \cos \alpha}$$



**Abb.1 Grundwelle des Netzstromes als
Funktion der Überlappung
bei verschiedenen Zündwinkeln**

H 213

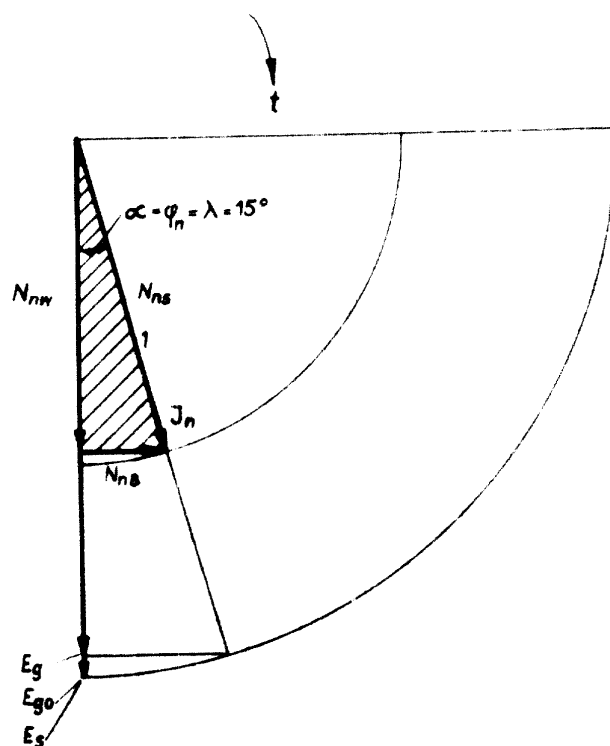


Abb.2 Vektordiagramm des Wechselrichters

Transformator ohne Streuung, starres Netz, $\alpha = \varphi = \lambda = 15^\circ = \text{Konst}$

α	Zündwinkel	E_g	Gleichspannung bei Zündwinkel α
φ_n	Phasenwinkel der Grundwelle auf der Netzseite	N_{nw}	Netzwirkleistung
λ	Löschwinkel	N_{ns}	Grundwellenblindleistung (Netzseite)
E_s	Sekundärspannung des Transformators (Gefäß-Seite)	N_{ns}	Grundwellenscheinleistung (Netzseite)
E_{g0}	Gleichspannung bei voller Aussteuerung	J_n	Grundwellenstrom

H 213

$$\text{---} \quad \varphi_n = \alpha - \frac{u}{2} + \varphi'; \quad \text{tg } \varphi' = \frac{\bar{u} - \sin \bar{u}}{\bar{u} + \sin \bar{u}} \cdot \text{ctg}(\alpha - \frac{u}{2}) \quad \text{exakte Formel}$$

$$\text{- - -} \quad \varphi_n = \alpha - \frac{u}{2} \quad 1. \text{ Näherung}$$

$$\text{---} \quad \varphi_n \text{ aus } \cos \varphi_n = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos \lambda] \quad 2. \text{ Näherung}$$

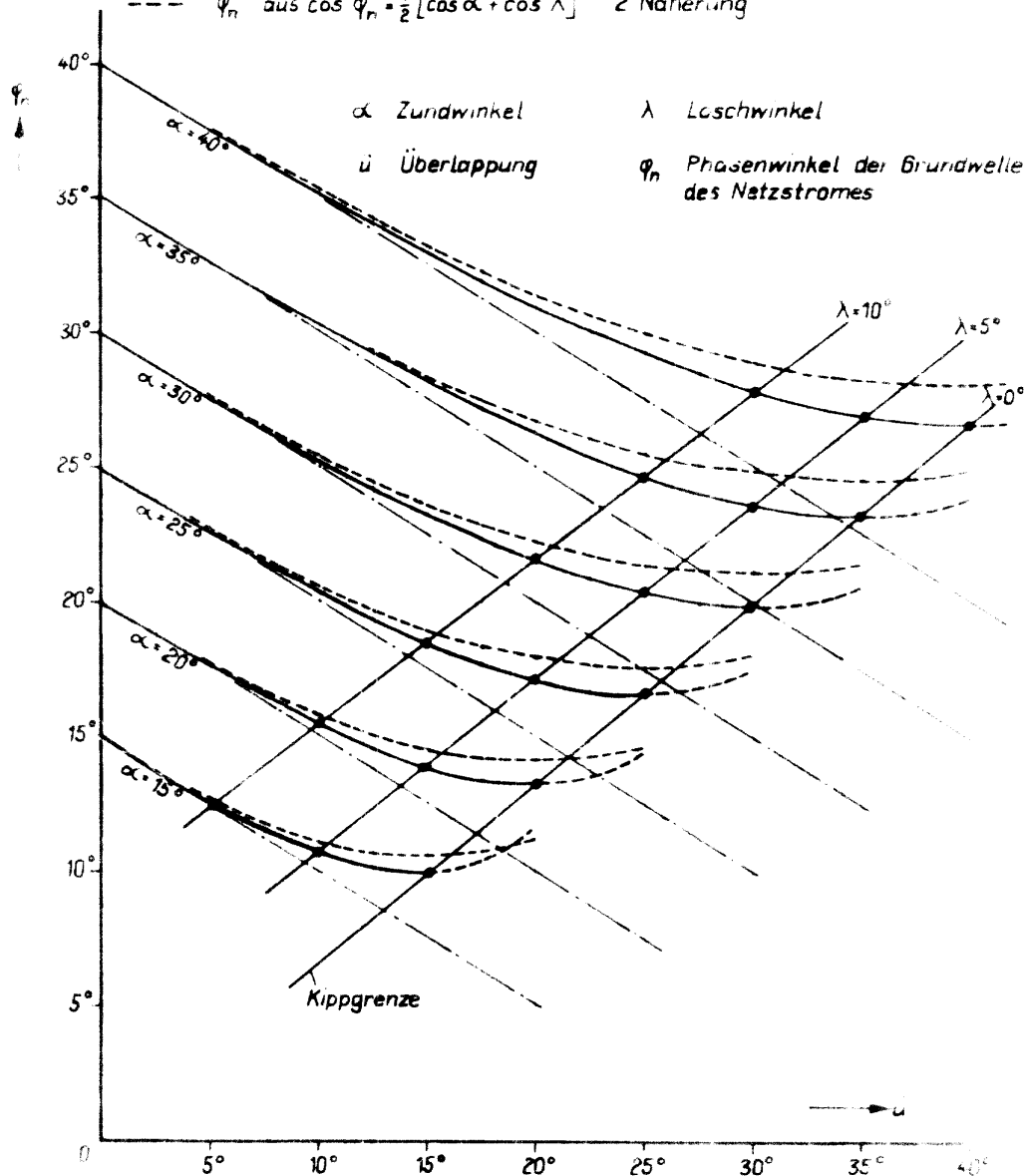


Abb.3 Phasenwinkel des Netzstromes als Funktion der Überlappung bei verschiedenen Zündwinkeln.

H 213

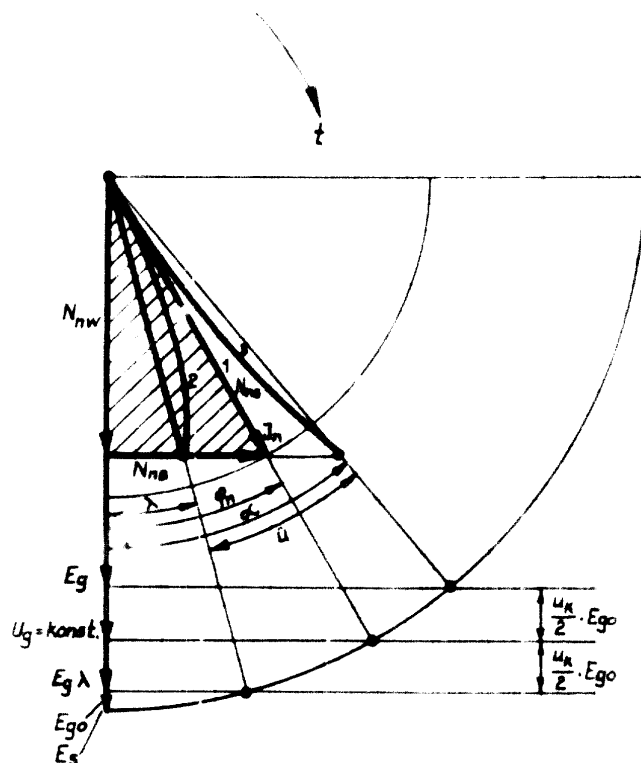


Abb.4 Vektordiagramm des Wechselrichters

Transformator mit Streuung, starres Netz, konstanter Leistungsfaktor
 $\cos \varphi_n = 0,866$ $u_k = 20\%$, Löschwinkel im Nennbetrieb $\lambda = 15^\circ$

α	Zündwinkel	U_g	Gleichspannung bei Belastung
φ_n	Phasenwinkel der Grundwelle auf der Netzseite	N_{nw}	Netzwirkleistung
λ	Löschwinkel	N_{ns}	Grundwellenblindleistung (Netzseite)
E_s	Sekundärspannung des Transformators im Leerlauf (Gefäß-Seite)	N_{ns}	Grundwellenscheinleistung (Netzseite)
E_{go}	Leerlaufgleichspannung bei voller Aussteuerung	u_k	Nennkurzschluß-Spannung
E_g	Leerlaufgleichspannung bei Zündverzögerung	I_g	Grundwellenstrom

$E_{g\lambda}$ Löschwinkelgleichspannung $E_{g0} \cos \lambda$

H 213

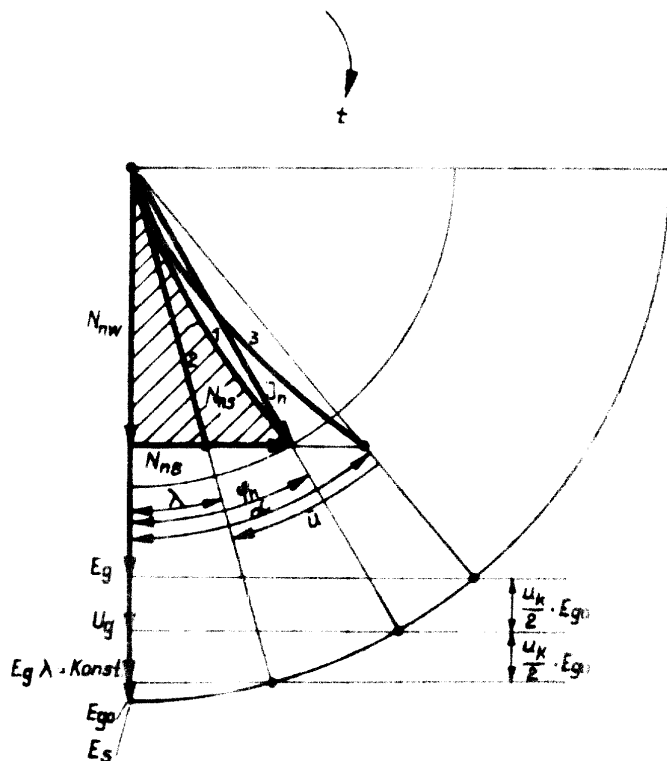


Abb.5 Vektordiagramm des Wechselrichters

Transformator mit Streuung, starres Netz, konstanter Löschwinkel
 $\lambda = 15^\circ$, $u_k = 20\%$

α	Zündwinkel	U_g	Gleichspannung bei Belastung
φ_n	Phasenwinkel der Grundwelle auf der Netzseite	N_{mw}	Netzwirkleistung
λ	Löschwinkel	N_{nb}	Grundwellenblindleistung (Netzseite)
E_s	Sekundärspannung des Transformators im Leerlauf (Gefäß-Seite)	N_{ns}	Grundwellenscheinleistung (Netzseite)
E_{go}	Leerlaufgleichspannung bei voller Aussteuerung	u_k	Nennkurzschluß-Spannung
E_g	Leerlaufgleichspannung bei Zündverzögerung	J_n	Grundwellenstrom
$E_{g\lambda}$ Löschwinkelgleichspannung $E_{go} \cdot \cos \lambda$			

H 213

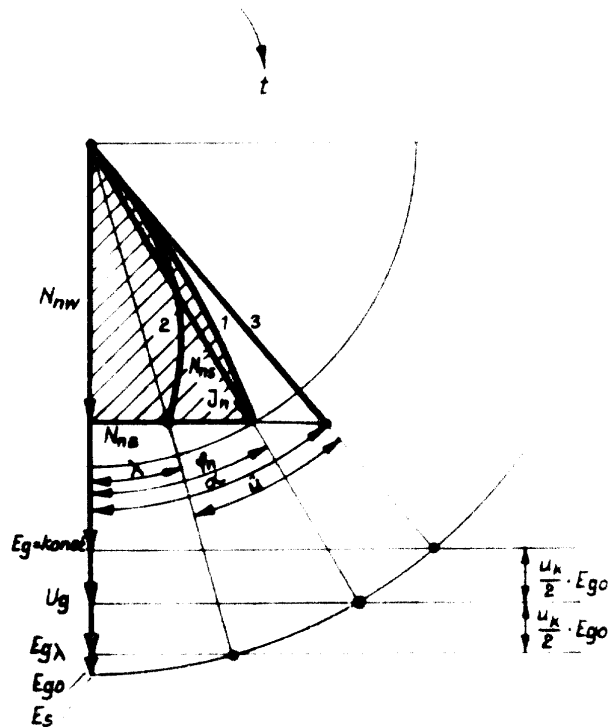
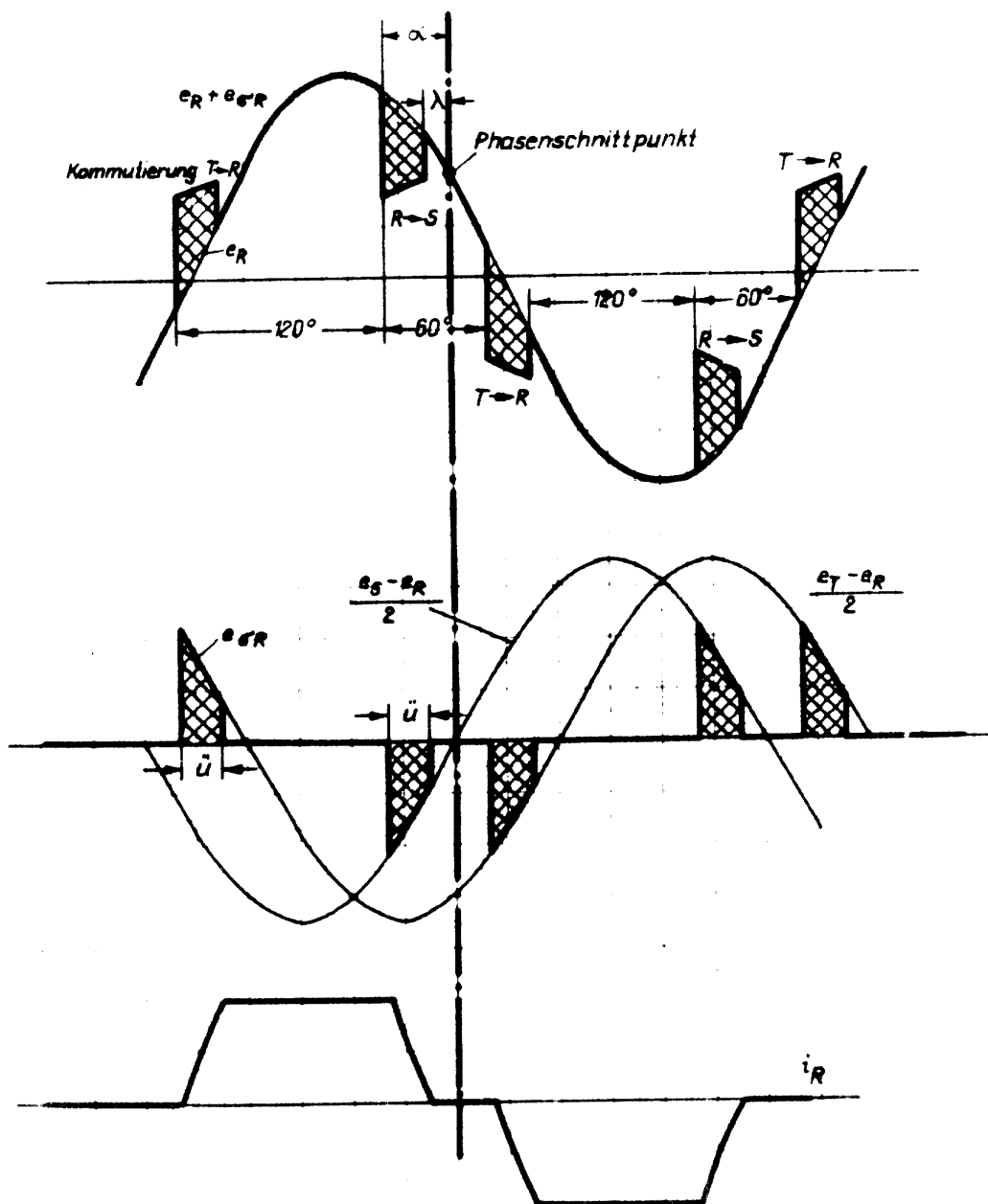


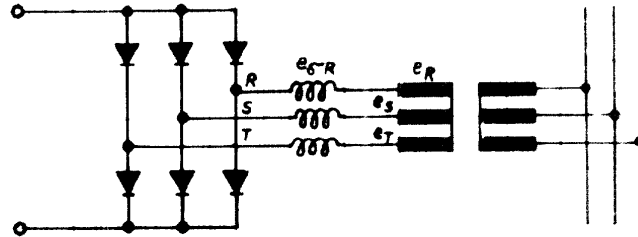
Abb.6 Vektordiagramm des Wechselrichters

Transformator mit Streuung, starres Netz, konstanter Zündwinkel $\alpha = 40^\circ$
 $u_k = 20\%$, Löschwinkel im Nennbetrieb $\lambda = 15^\circ$

α	Zündwinkel	U_g	Gleichspannung bei Belastung
φ_n	Phasenwinkel der Grundwelle auf der Netzseite	N_{nw}	Netzwerkleistung
λ	Löschwinkel	N_{nb}	Grundwellenblindleistung (Netzseite)
E_s	Sekundärspannung des Transformators im Leerlauf (Gefäß-Seite)	N_{ns}	Grundwellenscheinleistung (Netzseite)
E_{go}	Leerlaufgleichspannung bei voller Aussteuerung	u_k	Nennkurzschluß-Spannung
E_g	Leerlaufgleichspannung bei Zündverzögerung	J_n	Grundwellenstrom
	$E_{g\lambda}$		Löschwinkelgleichspannung $E_{go} \cdot \cos \lambda$



H 213



- $e_{R,S,T}$ sekundäre Transformatorspannungen im Leerlauf
 $e_{\sigma R}$ Spannungsabfall an der auf die Gefäß-Seite reduzierten Streuinduktivität der Phase R
 α Zündwinkel
 λ Löschwinkel
 \bar{u} Überlappung
 i_R Strom der Phase R

Abb. 7 Ströme und Spannungen auf der Gefäß-Seite des Wechselrichtertransformators

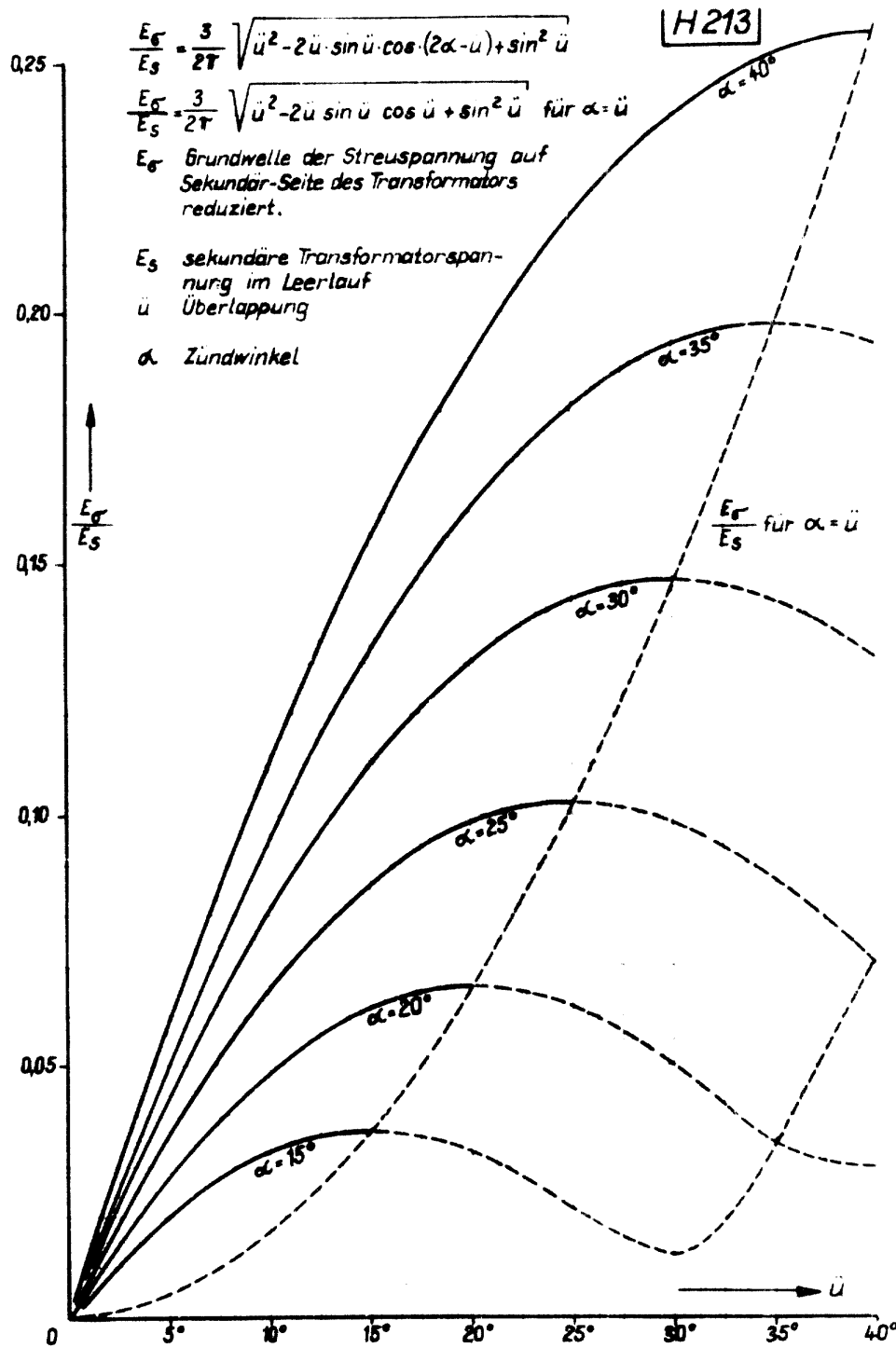
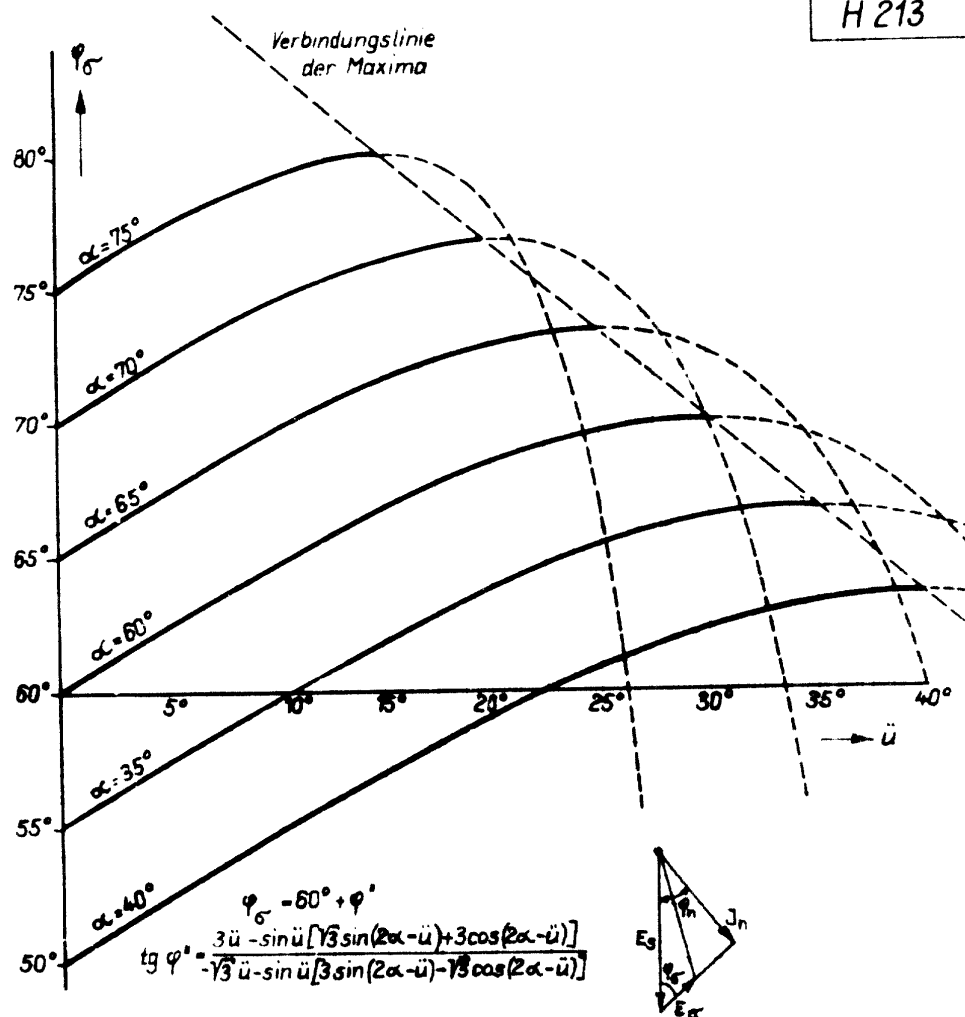


Abb.8 Grundwelle der Streuspannung des Transformators als Funktion der Überlappung bei verschied. Zündwinkeln

H 213



**Abb. 9 Phasenwinkel der Streuspannungsgrundwelle
als Funktion der Überlappung bei verschied. Zündwinkeln**

E_S sek. Transformatorspannung im Leerlauf	\ddot{u} Überlappung
E_σ Grundwelle der Streuspannung auf Sek.Seite des Transformators reduziert	α Zündwinkel
J_n Grundwelle des Netzstromes	φ_σ Phasenwinkel der Streuspannung
φ_n Phasenwinkel des Netzstromes	

H 213

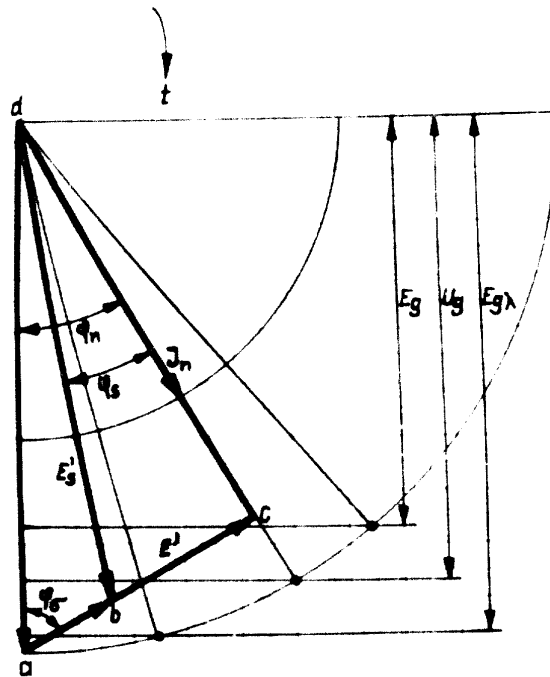


Abb. 10 Vektordiagramm des Wechselrichters

Einfügung der Streuspannung, starres Netz
 $u_k = 20\%$, Löschwinkel im Nennbetrieb $\lambda = 15^\circ$

φ_n	Phasenwinkel der Grundwelle auf der Netzseite	E_g	Grundwelle der Streuspannung auf Sekundär-Seite bezogen
φ_s	Phasenwinkel der Grundwelle des Netzstromes zur Grundwelle der Sekundärspannung	E_g	Leerlaufgleichspannung bei Zündverzögerung
E_s	Sekundärspannung des Transformators im Leerlauf (Befäß-Seite)	U_g	Gleichspannung bei Belastung
E'_s	Grundwelle der Sekundärspannung bei Belastung	$E_{g\lambda}$	Löschwinkelgleichspannung $E_{g0} \cdot \cos \lambda$

H 213

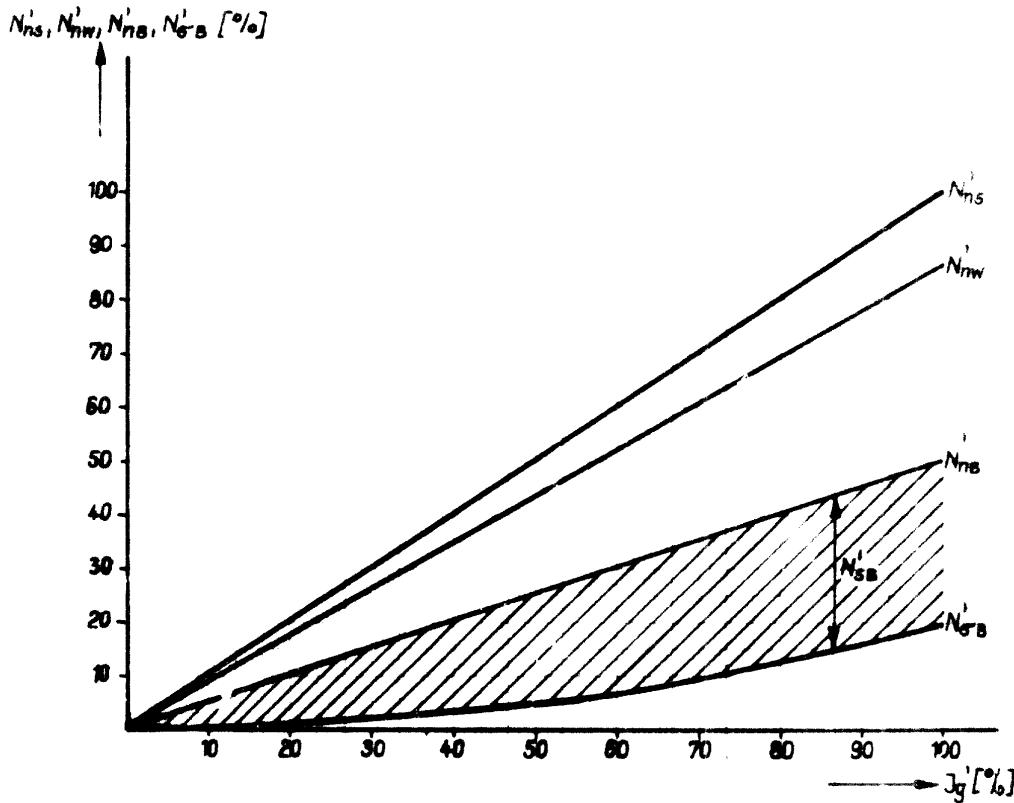


Abb. 11 Leistungen auf der Netz- und Befäß-Seite

$u_k = 20\%$, LÖschwinkel im Nennbetrieb $\lambda = 15^\circ$, konst. Leistungsfaktor $\cos \varphi_n = 0,866$

J_g auf den Nennwert bezogener Gleichstrom $J_g = \frac{J}{J_{\text{nenn}}}$

N_{ns} auf Nennlast bezogene Scheinleistung $N_{ns} = \frac{N_{\text{sa}}}{E_{\text{go}} \cdot J_{\text{genn}}}$

N_{nw} auf Nennscheinleistung bezogene Wirkleistung $N_{nw} = \cos \varphi_n \cdot N_{ns}$

N_{nb} auf Nennscheinleistung bezogene Netzblindleistung $N_{nb} = \sin \varphi_n \cdot N_{ns}$

N_{sb} auf Nennscheinleistung bezogene Streublindleistung $N_{sb} = \frac{5}{8} u_k \cdot N_{ns} \cdot J_g$

u_k Nennkurzschluß-Spannung

H 213

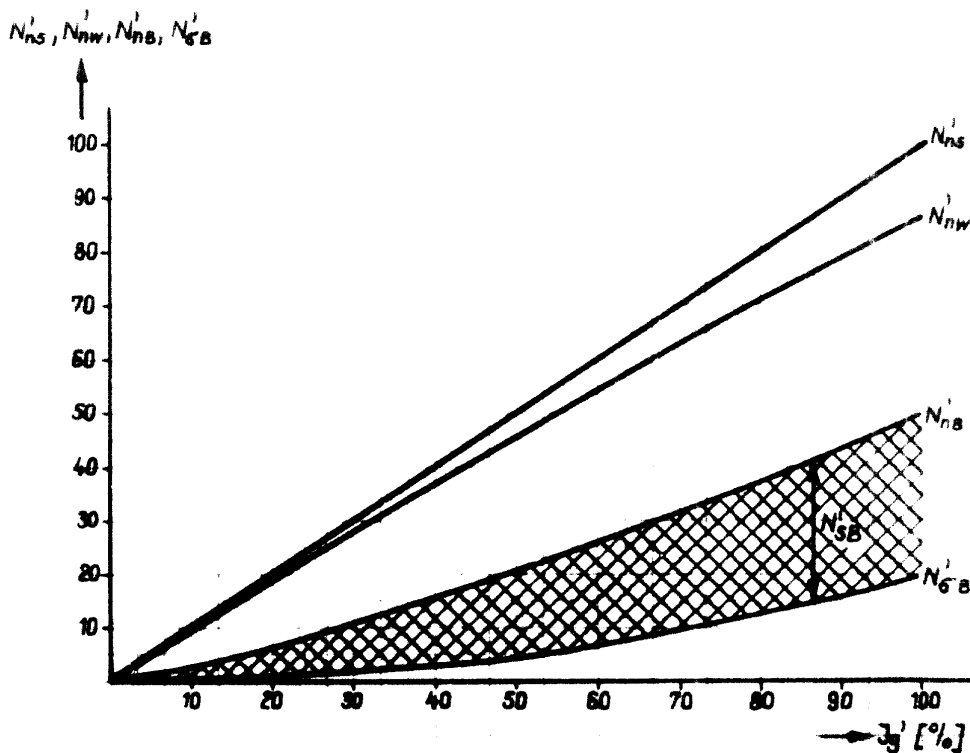


Abb. 12 Leistungen auf der Netz- und Gefäß-Seite

$u_k = 20\%$ konstanter Löschwinkel $\lambda = 15^\circ$

- J_g' auf den Nennwert bezogener Gleichstrom $J_g' = \frac{J_g}{J_{genn}}$
 N'_{ns} auf Nennlast bezogene Scheinleistung $N'_{ns} = \frac{N_{ns}}{E_g \cdot J_{genn}}$
 N'_{nw} auf Nennscheinleistung bezogene Wirkleistung $N'_{nw} = \cos \varphi_n \cdot N'_{ns}$
 N'_{ns} auf Nennscheinleistung bezogene Netzblindleistung $N'_{ns} = \sin \varphi_n \cdot N'_{ns}$
 N'_{sb} auf Nennscheinleistung bezogene Strahlblindleistung $N'_{sb} = \frac{2}{\pi} u_k \cdot N'_{ns} \cdot J_g'$
 u_k Nennkurzschluß - Spannung